

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2519175

基于 GA-BP 算法修正辐射误差的高精度温度传感器*

田祥民^{1,2,3} 刘清倦^{1,2,3} 唐杰^{1,2,3} 李振宇^{1,2,3} 曹希龙^{1,2,3}

(1.南京信息工程大学江苏省大气环境与装备技术协同创新中心 南京 210044;2.南京信息工程大学江苏省气象探测与信息处理重点实验室 南京 210044;3.南京信息工程大学电子与信息工程学院 南京 210044)

摘要: 太阳辐射引起的气温测量误差,即太阳辐射误差,最高可达 1 K。为提高测温精度,同时针对强制通风测温装置功耗较大的问题,设计了一种无刷直流(BLDC)风机通风的温度传感器装置,兼具自然通风与强制通风功能,有效降低功耗。采用计算流体动力学方法(CFD)对传感器进行多物理场流固耦合仿真,量化不同条件下的辐射误差,以最小化辐射误差为目标建立风速与太阳辐射强度对风机吸压的函数映射关系,制定风机调控策略。对比选择遗传算法优化的 BP 神经网络算法(GA-BP)对仿真数据集进行训练与拟合,从而构建辐射误差修正方程。以 076B 温度传感器为基准进行外场实验,测得设计的温度传感器经算法修正后的辐射误差控制在 0.05 K 以内,平均绝对误差为 0.039 K,均方根误差为 0.045 K。

关键词: 辐射误差;直流无刷风机;计算流体动力学仿真;遗传算法;逆向传播神经网络

中图分类号: TN98; P412.11 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4

High-precision temperature sensor for correcting radiation error based on GA-BP

Tian Xiangmin^{1,2,3} Liu Qingquan^{1,2,3} Tang Jie^{1,2,3} Li Zhenyu^{1,2,3} Cao Xilong^{1,2,3}

(1. Jiangsu Collaborative Innovation Center on Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Observation and Information Processing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 3. School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: The temperature measurement error caused by solar radiation, that is, the solar radiation error, can be as high as 1 K. To improve the temperature measurement accuracy, and to address the problem of high power consumption of traditional forced ventilation temperature measurement device, a temperature sensor device for brushless DC (BLDC) fan ventilation is designed, which combines natural ventilation and forced ventilation functions, effectively reducing power consumption. The computational fluid dynamics (CFD) method is utilized to conduct multi-physical field fluid-structure coupling simulation of the sensor and quantify the radiation error under different conditions, and the functional mapping relationship between wind speed and solar radiation intensity and the suction pressure of the wind turbine is established by minimizing the radiation errors, and formulate the wind turbine control strategy. The genetic algorithm-optimized BP neural network (GA-BP) algorithm optimized by genetic algorithm was compared and selected to train and fit the simulation data set, thereby constructing the radiation error correction equation. Finally, through the field comparison experiment with the 076B temperature sensor, it is shown that the radiation error of the designed temperature sensor after algorithm correction can be controlled within 0.05 K, the mean absolute error was 0.039 K, and the root mean square error was 0.045 K.

Keywords: radiation error; DC brushless fan; computational fluid dynamics simulation; genetic algorithm; backpropagation neural network

0 引言

随着全球变暖加剧,气候危机对人类社会的威胁日益显

著^[1],当前全球地表温度较工业革命时期上升了 1.09 K,预计未来 20 年内将达 1.5 K^[2]。我国近期召开的政府间气候变化专门委员会(IPCC)第 7 次评估周期(AR7)评估报

收稿日期:2025-06-23

* 基金项目:国家自然科学基金(42275143)项目资助

告大纲解读会上指出,预测气候变化成为全球气候治理的关键议题^[3]。气象温度是衡量气候变化趋势的关键指标,其测量精度直接影响气候模型预测的可靠性。在当前极端天气识别与气温变化趋势等研究中,对温度测量精度已提出 0.05 K 量级的要求^[4]。当前测温系统常采用自然通风及强制通风以增强散热,从而降低辐射误差。敖振浪等^[5]设计了一款内嵌式强制通风防辐射装置,置于百叶箱内,保护装置避免直接雨淋日晒,风速为 3 m/s 时,最大误差为 0.8 K。姚澄等^[6]设计了一款结构简单的防辐射罩,利用风扇调节通风强度,但因扇叶无法有效遮蔽太阳辐射,导致辐射误差较大,其均方根误差为 0.129 K。Ramesh 等^[7]基于“太阳能烟囱”的概念,设计了一款无风温室测温装置,结合水平 PVC 管道吸气实现强制通风,可将温室中较大的测温误差降低至 1 K 以内。Waugh^[8]提出一种用于移动气象平台的测温装置,采用“对称 U 型管”进行通风,车速快时借助动压通风,车速慢时通过小型风扇进行通风,辐射误差控制在 0.4 K 以内。以上温度传感器装置中,测温探头置于管道内部、通过内置风扇等方式进行强制通风的传感器,其全天候运转的能耗较高,目前偏远地区的气象站多采用清洁能源进行供电,难以承受较大能耗^[9];而通过调节风扇转速,改变通风强度的传感器,无法有效保护通风装置,且受太阳辐射影响较大,其测温精度较低。

本文针对现有的温度传感器易受环境干扰,精度较低,以及传统强制通风装置功耗高的问题,根据部分测温装置中采用的管道通风结构,设计了一款通风强度可调的温度传感器装置。该装置采用管道式通风结构,将无刷直流 (brushless DC, BLDC) 风机置于管道出风口进行吸气通风,并根据环境条件调节通风强度,以降低装置功耗。同时采用遗传算法优化的 BP 神经网络构建辐射误差修正模型,预测不同条件下的太阳辐射误差,对实测温度进行修正,提高测温精度。风机通风强度调控策略的制定以及辐射误差修正模型的训练,均基于计算流体动力学 (computational fluid dynamic, CFD) 方法对传感器进行的仿真,该仿真分析了不同环境条件下辐射误差随风机吸气压力变化的规律,为策略制定和模型训练提供了数据基础。最后通过外场实验对传感器的测温精度进行了验证。

1 温度传感器装置设计

1.1 传感器装置结构设计

在自然通风方面,本温度传感器装置主要由上下铝板与导流台构成。铝板直径 200 mm,厚度 4 mm,可反射太阳直射与地面反射辐射,内表面涂黑以吸收二次反射,降低多源辐射干扰。导流台直径 100 mm,厚度 2 mm,具备良好的引流与气流分散能力,本文在 CFD 仿真中对不同导流结构进行了对比分析。

在强制通风方面,传感器装置的吸气管道垂直下置,与铝板、导流台相连接,管道出风口连接 BLDC 风机,可在测

温探头周围建立稳定的气流路径,减少逆流和涡流干扰。管道采用灰色 PVC 材质,外部包覆高反射率铝层,兼顾结构强度与耐候性,同时有效反射外部辐射。

为提高响应速度并进一步减小辐射干扰,测温探头采用直径 8 mm 的空心铜球与 Pt100 铂电阻构成。铜球外壳可屏蔽外部辐射,同时加速气温传导至铂电阻。Pt100 铂电阻利用阻值随温度变化的特性实现高精度测量。探头内部通过焊点连接铂电阻引脚与导线,采用四线制连接方式,分开电流回路和电压回路^[10],减小引线误差。并通过 24 位模数转换器 (AD7793) 进行数据采集与转换。铜球腔体内部及开口处填充高导热密封胶,提升热传导效率,防止水汽、微粒侵入造成短路或阻值漂移,增强系统在高湿、风沙等复杂环境下的稳定性。

相较于小型风扇垂直通风的传感器结构,本设计采用密闭管道连接远端风机进行定向通风,有效避免了风机运行时产生的热量对探头局部温场的干扰,并克服了开放式风罩无法有效遮蔽太阳辐射的问题。此外,风机吸气通风在相同风量输出的条件下,其转速更低,并且封闭式外壳可在雨雪、暴晒等环境中保护扇叶,提升装置整体的耐候性能和运行寿命,适用于野外无人气象站。温度传感器装置示意图如图 1 所示。

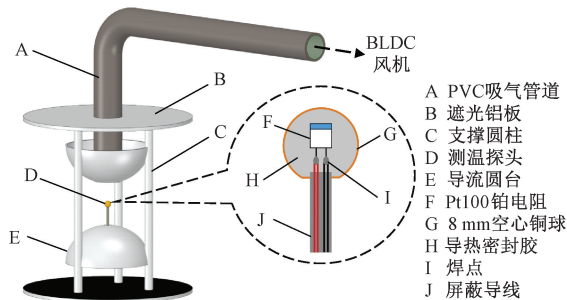


图 1 测温传感器装置示意图

Fig. 1 Temperature sensor model diagram

1.2 BLDC 风机通风系统设计

BLDC 风机组件设置于防辐射罩外部,吸气口与管道相连,风机叶轮连接 BLDC 转轴,基于 STM32 主控实现对风机的动态控制。系统主要包括风速与太阳辐射强度数据采集模块、BLDC 驱动模块、Cortex-M3 主控模块和反电动势过零检测模块;系统框图如图 2 所示。

本文采用无霍尔传感器的 BLDC 风机,利用反电动势检测法检测转子位置。与带霍尔传感器的相比,其结构更加紧凑,适用于高温、低温、高湿和高污染等复杂环境^[11]。电机启动阶段,采用三段式启动算法解决定位困难问题。在系统运行阶段,采用双闭环控制策略:内环为电流闭环,外环为转速闭环,实现对风机吸压强度的实时调节。太阳辐射传感器与风速传感器将当前环境数据通过 RS485 协议传入主控模块,系统根据风机调控策略自动调整转速,输出最优吸气全压,实现低功耗下的辐射误差最小化的目标。

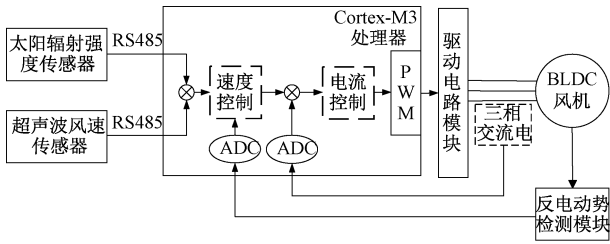


图 2 BLDC 风机通风系统框图

Fig. 2 Block diagram of the BLDC fan ventilation system

2 计算流体动力学仿真分析

在 CFD 仿真部分,本文首先对比验证了传感器装置中不同导流结构的导流效果,并评估了自然通风与强制通风条件下该装置对太阳辐射误差的抑制性能。最后,基于多物理场仿真方法,对不同环境条件下的太阳辐射误差进行了系统性仿真分析。

2.1 计算域构建与仿真前处理

为研究温度传感器装置在不同环境条件与通风强度下的温度场与流速场分布,本文采用 SpaceClaim 对装置及其周围的空气域进行三维建模,构建 CFD 仿真模型,如图 3 所示。随后利用 ANSYS Meshing 对整体流场进行非结构化网格划分。为兼顾计算精度与效率,对吸气管道和探头所处位置进行局部加密处理,最终生成约 580 万单元的网格,最小正交质量大于 0.3,最大长宽比为 21.2,各项指标均满足 Fluent 求解器在稳态模拟下的收敛与精度要求^[12]。

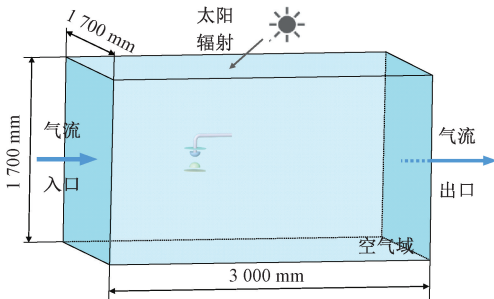


图 3 CFD 仿真模型

Fig. 3 CFD simulation model

2.2 流固耦合仿真分析

本文使用 Fluent 软件进行仿真分析,为模拟太阳辐射、通风散热等过程,仿真模型启用能量方程,并开启太阳光线追踪功能^[13]。流体区域选用 Realizable k- ϵ 湍流模型,适用于中等至强旋流及附着分离的低马赫数内流问题,能够准确反映空气在管道、罩体及探头周围的流动特性^[14]。边界条件参数设置中,空气域入口设为速度入口,以模拟环境风速;出口设为压力出口,确保流体质量守恒;风机管道出口设为 Fan 边界,并设定相应负压值以模拟 BLDC 风机吸气;吸气管道入口端设为内部面,连接空气域。为提高求解效率,采用稳态初始化,压力-速度耦合采用 SIMPLE 半隐式

算法以保障数值稳定性与收敛性,网格迭代收敛后进行多组稳态分析。

自然通风时,参数设置如下:海拔高度 0.022 km、太阳辐射强度 $1\,000\text{ W/m}^2$ 、风速 1 m/s 、太阳高度角 45° 、管道出口负压 0 Pa 。为对比不同导流台的引流能力,设置了若干组不同导流台的仿真对比实验,发现引流效果较好的为梯形与半圆形导流台,仿真结果如图 4、5 所示,两者在测温探头附近的气流速度分别为 1.09 m/s 、 1.16 m/s ;辐射误差分别为 0.104 K 、 0.097 K 。

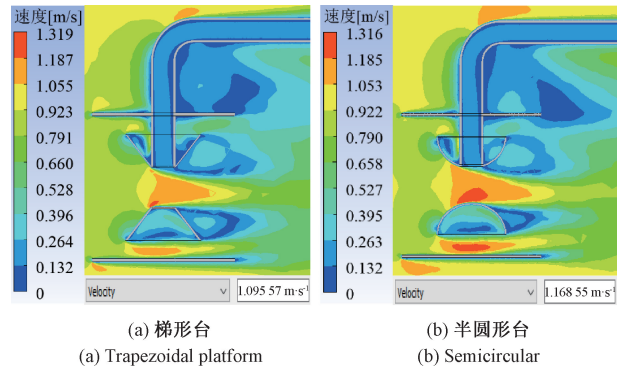


图 4 自然通风速度场

Fig. 4 Natural ventilation velocity field

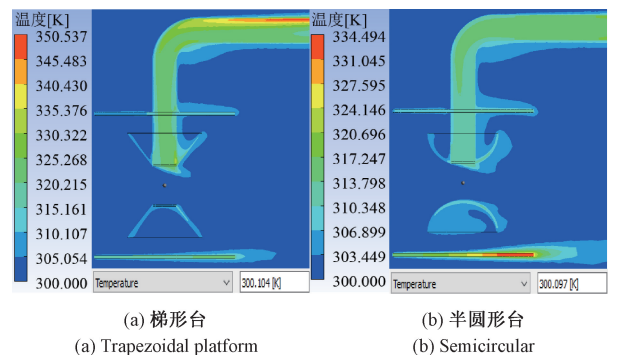


图 5 自然通风温度场

Fig. 5 Natural ventilation temperature field

以上对比仿真验证了半圆形导流台具有较好的引流能力,可在自然通风时有效抑制辐射误差。为对比传感器在自然通风与强制通风时的性能,设置一组强制通风仿真,将管道出口负压设为 600 Pa ,其余参数保持不变,结果如图 6 所示。

仿真结果显示,在强制通风模式下测温探头处的局部流速为 2.45 m/s ,辐射误差为 0.049 K 。表明该温度传感器装置在强制通风条件下,可有效提升通风换热效率,降低太阳辐射误差。

2.3 多物理场仿真与结果分析

太阳辐射误差主要是由太阳直射辐射与二次反射辐射引起的测温误差,但该误差还受海拔高度、太阳高度角以及风速的影响,为分析不同环境因素与风机吸压对辐射误差

的作用机制,采用多物理仿真方法进行计算。仿真结果如图 7 所示。仿真过程中,各参数取值范围已在图中标明,当某一参数不作为变量时,其基准取值分别设定为:太阳高度角 45° 、太阳辐射强度 $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$ 、海拔高度 $0\ \text{km}$ 、风速 $1\ \text{m}/\text{s}$;根据仿真结果可以得出以下结论:由图 7(a)可知,当太阳高度角处于 $20^\circ\sim 40^\circ$ 时,辐射误差明显增大,主要因遮光铝板难以完全遮挡该角度的直射阳光,部分阳光照射至探头导致辐射误差上升。由图 7(b)可知,太阳辐射强度不变时,辐射误差随风机吸压增大而减小。随着吸压增

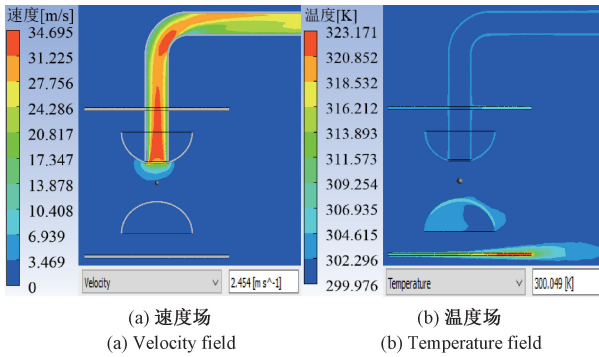
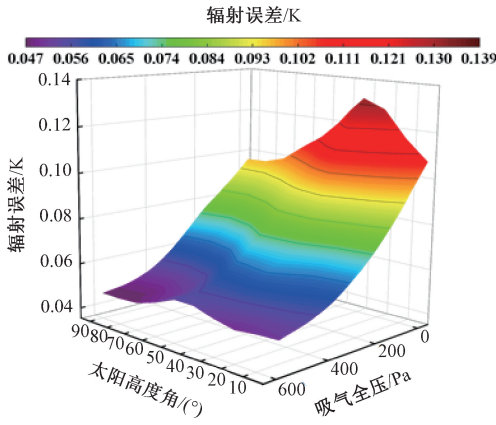
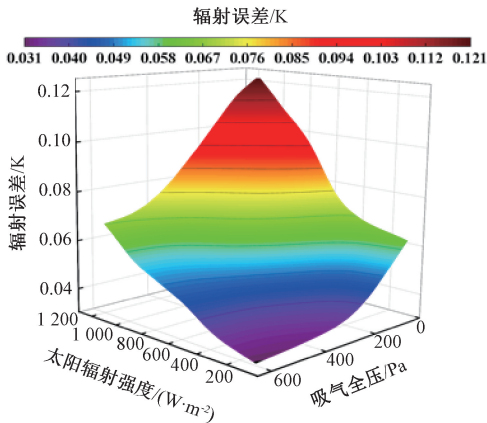


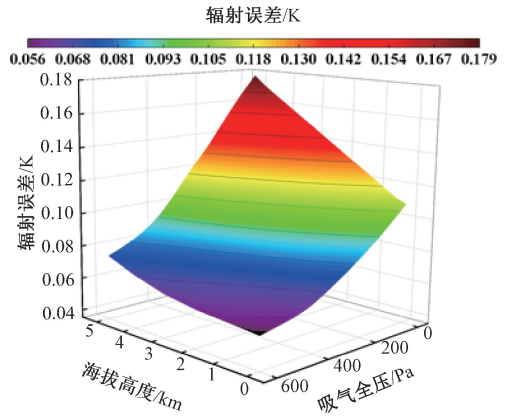
图 6 强制通风仿真结果
Fig. 6 Simulation results of forced ventilation



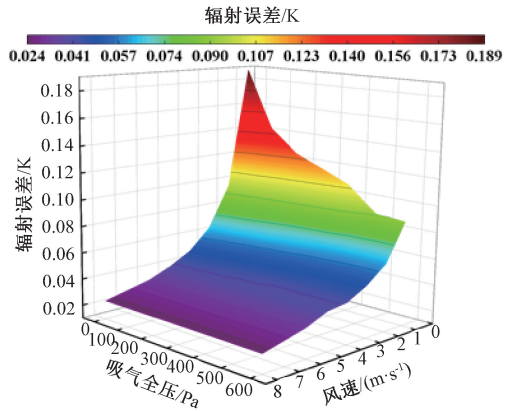
(a) 太阳高度角
(a) Solar altitude angle



(b) 太阳辐射强度
(b) Solar radiation intensity



(c) 海拔高度
(c) Altitude



(d) 风速
(d) Wind speed

图 7 不同环境条件、风机吸压与辐射误差的关系
Fig. 7 The effects of environmental conditions and fan suction pressure on radiation error

大,太阳辐射强度对辐射误差的影响减弱,当吸压从 $0\ \text{Pa}$ 增加到 $600\ \text{Pa}$ 时,因太阳辐射强度变化引起的辐射误差变化值从 $0.059\ \text{K}$ 降低到 $0.036\ \text{K}$;由图 7(c)可知,随着海拔高度增加,空气逐渐稀薄,相同风机吸压下气流速度更低,导致辐射误差变大。海拔 $5\ \text{km}$ 时,吸压从 $0\ \text{Pa}$ 增加至 $400\ \text{Pa}$,辐射误差降低 $0.087\ \text{K}$,增加至 $600\ \text{Pa}$ 时,辐射误差仅降低 $0.017\ \text{K}$,降幅趋缓。由图 7(d)可知,风机吸压固定时,辐射误差随风速增大而降低,降幅逐渐趋缓。在风速低于 $1\ \text{m}/\text{s}$ 时,风机吸压从 0 增加至 $600\ \text{Pa}$,辐射误差显著降低,降幅达 $0.1\ \text{K}$ 。为减小太阳辐射引起的测温误差,本研究首先通过风机强制通风增强热交换效率,抑制太阳辐射影响,从而降低测温误差;其次,构建辐射误差修正模型,根据环境参数对辐射误差进行预测。由于在实际环境中,海拔高度与太阳高度角在实际环境中的变化频率较低,故风机通风强度仅依据变化频率高的太阳辐射强度与风速进行实时调控,海拔高度与太阳高度角则在辐射误差修正模型中作为环境参数引入。

2.4 风机通风策略:

为实现基于风速与太阳辐射强度的风机吸压调控,本文依据仿真数据构建了以最小化辐射误差为目标的线性回归方程。首先建立风速 V (单位为 m/s) 与太阳辐射强度 S (单位为 W/m^2) 对吸压 Q (单位为 Pa) 的函数映射关系,然后提取各工况下的最优吸气全压值,建立样本集 (V, S, Q) ,最后采用普通最小二乘法 (ordinary least square method, OLS) 进行线性回归拟合^[15],得到风机吸压控制方程如式(1)所示:

$$Q(V, S) = -48.35 \cdot V + 0.034 \cdot S + 613 \quad (1)$$

为实现风机驱动控制,还需将目标风机吸压 Q (单位为 Pa) 转换为对应的转速 N (单位为 RPM)。根据离心式风机的气动特性,其吸气全压与转速之间满足 $Q \propto N^2$ 的非线性关系。当风机转速为 $24\ 000\ \text{RPM}$ 时,对应吸压为 $6.2\ \text{kPa}$,据此推导出风机吸气全压与转速之间关系为:

$$N = 304.33 \cdot \sqrt{Q} \quad (2)$$

风机调控的流程图如图 8 所示。

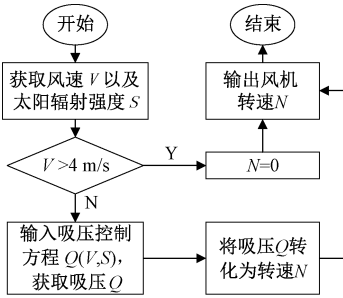


图 8 调控风机通风流程图

Fig. 8 Flowchart for regulating fan ventilation

仿真数据表明,当环境风速 $V > 4\ \text{m/s}$ 时,强制通风减小辐射误差的效果减弱,最大仅降低 $0.007\ \text{K}$ 。因此,系统在此条件下将关闭风机以降低能耗。

3 辐射误差修正算法设计

CFD 方法可在理想边界条件下计算有限工况的辐射误差,但无法全面覆盖实际应用场景,且由于环境复杂,辐射误差表现出一定非线性与动态特性^[16]。为提高传感器的测温精度,本文设计了一种更具泛化能力的辐射误差修正模型,该模型基于环境参数与风机吸压对太阳辐射误差值进行预测,传感器的测温值与预测误差值做差即可得到修正后的测温值。

3.1 BP 神经网络算法设计

反向传播 (back propagation, BP) 神经网络是一种典型的前馈网络,适用于本研究的辐射误差与多环境参数之间的非线性映射问题。该网络由输入层、隐含层和输出层构成,神经元之间采用加权连接实现信息传递,并通过激活函数实现非线性变换^[17]。本文所设计的 BP 神经网络结构包括:输入层包含 5 个神经元,分别为风速 V 、太阳辐射

强度 P 、海拔高度 E 、太阳高度角 A 及风机吸气全压 R ;隐含层为单层结构,包含 5 个神经元,采用 Sigmoid 激活函数。输出层为预测的太阳辐射误差 ΔT ,采用线性激活函数;模型训练过程中,首先初始化网络权值与偏置参数,随后进行前向传播以计算预测值,再通过反向传播算法不断调整权重,迭代优化误差,直至网络收敛并得到稳定的预测结果。模型数学表达式为:

$$\Delta T = \text{purelin} \left\{ \sum_{j=1}^{10} w_j \cdot \text{tansig} \left(\sum_{i=1}^5 x_i \cdot w_{ij} + a_j \right) + b_k \right\} \quad (3)$$

其中, x_i 表示输入特征 (V, P, E, A, R), w_{ij} 为输入层至隐含层的连接权重; w_j 为隐含层至输出层权重; a_j 为隐含层偏置项; b_k 为输出层偏置项。

3.2 GA-BP 神经网络算法设计

BP 神经网络的训练效果依赖于初始权值和偏置的设置,为增强训练的稳定性,权值初始化通常在小范围内均匀采样。然而,BP 神经网络对初始值较敏感,易陷入局部最优解^[18],且收敛速度慢。为此,本文引入遗传算法 (genetic algorithm, GA) 对 BP 网络的初始权重和偏置进行全局优化,以提升模型的收敛性和精度。使用 GA 算法优化 BP 神经网络预测辐射误差数据的流程图如图 9 所示。

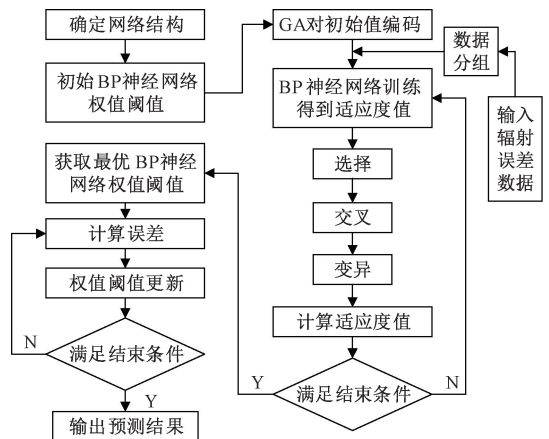


图 9 GA-BP 预测辐射误差流程图

Fig. 9 GA-BP predicted radiation error flowchart

构建的 GA-BP 模型中,首先对输入数据进行编码与归一化处理,构建种群个体,每个个体对应一组 BP 网络的初始权值与偏置向量。通过 BP 神经网络对每个个体进行训练,并计算其预测误差,以均方误差为评价指标,获得个体的适应度值。在此基础上,执行选择、交叉和变异等遗传操作以产生新一代种群,持续优化搜索全局最优参数组合^[18],并加载至 BP 网络完成训练与预测。本文设置的遗传算法超参数为:种群规模为 5,进化代数数为 50,学习率为 0.01。

3.3 BP 与 GA-BP 神经网络算法对比分析

为对比 BP 与 GA-BP 神经网络算法对辐射误差数据

的预测修正效果,本文随机抽取 100 组仿真数据作为测试集,将数据中风速、太阳辐射强度、海拔高度、太阳高度角和风机吸气全压值输入训练完成的 BP 与 GA-BP 神经网络模型,分别输出预测的辐射误差值,并与测试集中对应的辐射误差值进行对比,如图 10、11 所示。

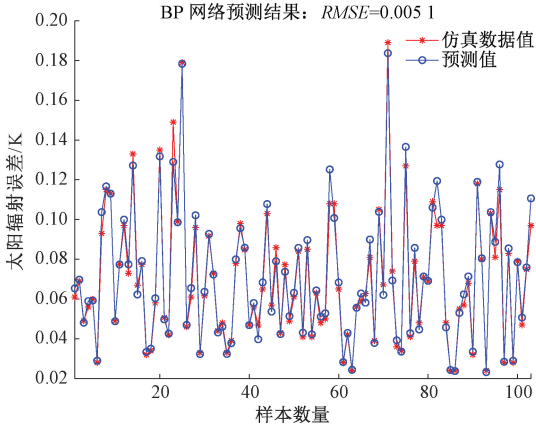


图 10 BP 神经网络算法预测结果

Fig. 10 Prediction results of BP neural network algorithm

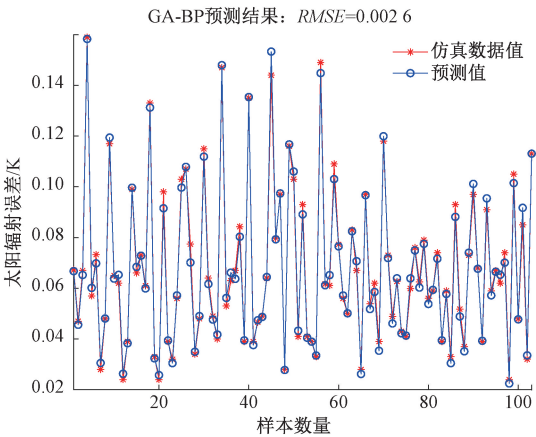


图 11 GA-BP 神经网络算法预测结果

Fig. 11 Prediction results of the GA-BP neural network algorithm

对比表明,两种算法对辐射误差的预测效果均表现良好,但 GA-BP 算法在处理尖峰数据时预测更为稳定。为进一步量化模型的预测性能,分别计算 BP 与 GA-BP 神经网络算法的平均绝对误差 (mean absolute error, MAE) 和均方根误差 (root mean square error, RMSE),如式(4)、(5)所示。

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta T_i| \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta T_i)^2} \quad (5)$$

其中, ΔT_i 表示第 i 组预测值与对应仿真数据中的太阳辐射误差差值, n 为样本总数。计算结果显示,BP 神经网络的预测结果与仿真数据之间的 MAE 为 0.003 2 K, RMSE 为 0.005 1 K;而 GA-BP 神经网络的 MAE 和 RMSE 分别为 0.002 3 K 和 0.002 6 K,整体精度更高,具

有更好的预测能力。因此,本文最终选用训练完成的 GA-BP 神经网络模型对太阳辐射误差进行预测修正。

4 实验验证与分析

4.1 实验平台搭建

为评估所设计温度传感器的测量准确性,在中国气象局气象探测中心观测基地 M7600 (118.42° E, 32.12° N, 22 m) 开展了为期 3 天的外场实验。实验以 Met One 公司生产的 076B 型温度传感器作为基准,该传感器配备风扇通风式防辐射罩,其标定的辐射误差小于 0.03 K,测温精度较高。实验中,本文传感器的辐射误差为传感器测温数据与上述基准温度之差。太阳辐射强度使用 CMP10 太阳辐射表测量,风速由 YF-2124b 超声波风速仪测量。实验观测平台如图 12 所示。

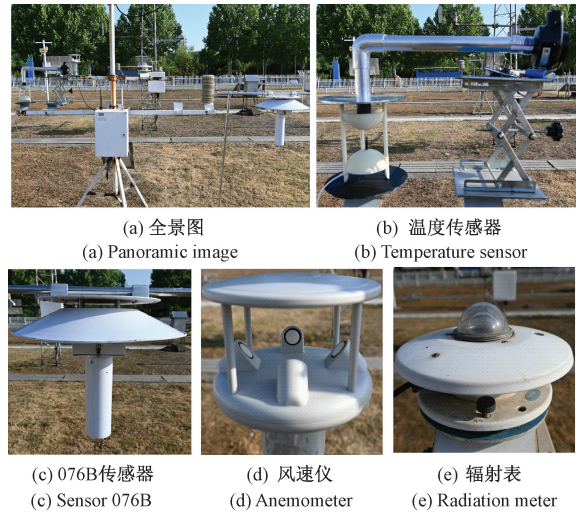


图 12 实验观测平台

Fig. 12 Experimental observation platform

4.2 实验结果分析

3 天外场实验期间,数据每 20 min 采集一次。实验期间的太阳辐射强度与风速数据如图 13、14 所示。

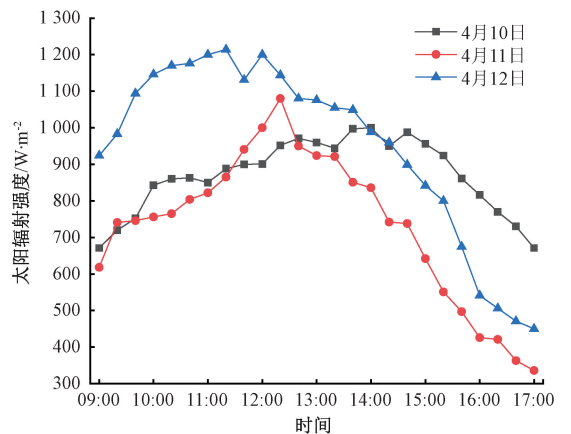


图 13 实验期间太阳辐射强度

Fig. 13 Solar radiation intensity during the experiment

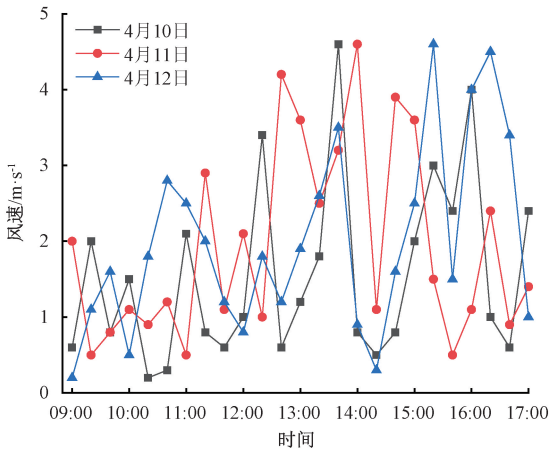


图 14 实验期间风速

Fig. 14 Wind speed during the experiment

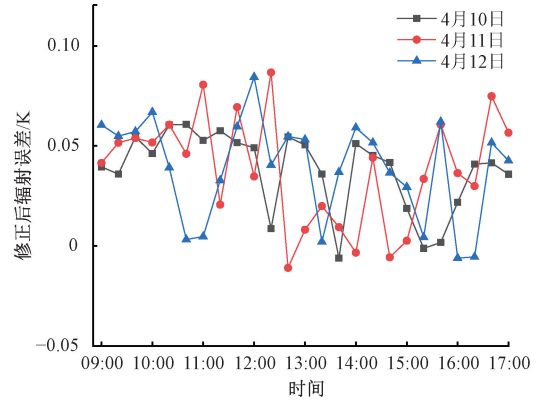


图 17 修正后的辐射误差

Fig. 17 Corrected radiation error

将实验采集的环境数据及根据风速和太阳辐射强度计算得到的风机吸压输入到训练完成的 GA-BP 神经网络模型中,得到辐射误差预测值,实验辐射误差值与该值之差即为修正后的太阳辐射误差。实验流程如图 15 所示。每组实验数据中修正前与对应修正后的太阳辐射误差如图 16、17 所示。部分实验数据如表 1 所列。

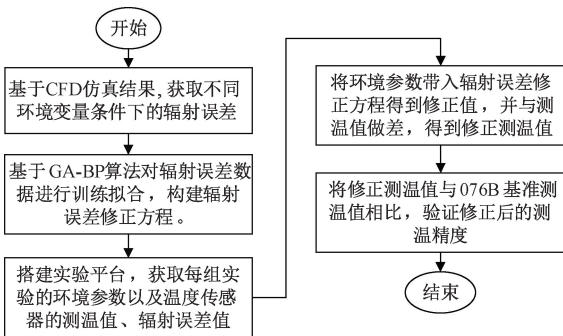


图 15 实验验证流程图

Fig. 15 Experimental verification flowchart

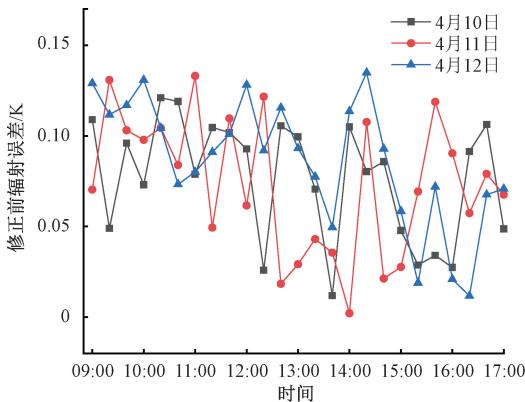


图 16 修正前的辐射误差

Fig. 16 Radiation error before correction

表 1 部分实测环境参数值与相关辐射误差值

Table 1 Some experimental environment parameter values and related radiation error values

太阳辐射强度/ ($W \cdot m^{-2}$)	风速/ ($m \cdot s^{-1}$)	太阳高度角/ ($^{\circ}$)	吸气全压/ Pa	修正前 辐射 误差/K	修正后 辐射 误差/K
865	2.9	65	502	0.049	0.021
842	2.5	44	520	0.058	0.029
497	0.5	31	606	0.119	0.061
770	1.0	25	581	0.091	0.041
671	2.4	19	510	0.049	0.036
1 076	1.9	64	557	0.093	0.053
843	1.5	53	559	0.073	0.046
804	1.2	60	582	0.084	0.046
551	1.5	37	559	0.069	0.034
842	2.5	44	520	0.058	0.029
865	2.9	65	502	0.049	0.021
952	3.4	67	471	0.026	0.009
642	3.6	44	461	0.028	0.003
800	4.6	37	0	0.019	0.004
997	4.6	58	0	0.012	-0.006

为评估辐射误差修正模型的准确性,分别计算温度传感器的测温值与基准值之间的 MAE 与 RMSE:修正前辐射误差的 MAE 为 0.078 K, RMSE 为 0.085 K;修正后分别降至 0.039 K 与 0.045 K,表明,经 GA-BP 算法修正后,传感器测温值与基准值之间的一致性显著提升。文献[6]设计的强制通风温度传感器,其 RMSE 为 0.129 K,相较而言,本文所设计的温度传感器装置精度更高,满足当前测温精度要求。

5 结 论

为了提高气温测量精度,并降低强温度传感器的功耗,本文提出了一种 BLDC 风机通风的高精度温度传感器装

置,兼顾低功耗设计。首先,设计了传感器装置与防辐射罩的结构,仿真验证了结构的优良性。其次,通过 CFD 仿真,得到环境参数及风机吸压对辐射误差的影响,据此制定风机的调控策略;在此基础上,基于 GA-BP 算法对仿真数据进行训练拟合,建立误差修正模型,对实测温度进行修正。最后开展对比实验,检验修正后的测温精度。得到主要结论为:

本装置在自然通风时,辐射误差为 0.097 K;在强制通风时,相应环境条件下的辐射误差为 0.049 K,表明该装置对辐射误差具有较好的抑制效果,且强制通风可显著降低辐射误差。多物理场仿真分析表明,辐射误差与太阳辐射强度、海拔高度呈正相关,与风速和风机吸压呈负相关。在风速低于 1 m/s 时,风机吸压从 0 提高至 600 Pa,辐射误差可降低约 0.1 K,表明该装置在低风速下对辐射误差的抑制能力较强。基于 GA-BP 算法预测的辐射误差数据,其预测平均误差为 0.002 3 K,均方根误差为 0.002 6 K,表明 GA-BP 算法具备良好的精度与泛化性能。外场实验结果表明,经算法修正后测温平均误差为 0.039 K,均方根误差为 0.045 K,满足 0.05 K 量级的高精度测温需求。

受限于仿真条件,本文未考虑湿度、风沙颗粒物等因素对测温精度的影响。后续可集成湿度、气压等传感器,并引入光伏供电,评估系统的续航能力,拓展其在野外无人气象站的应用潜力。

参考文献

- [1] 李宸昊,梁文钧,胡辉,等. 中国地球气候系统模式在 CMIP6 中的影响力分析及 CMIP7 概况[J]. 地球科学进展, 2025, 40(2): 155-168.
LI CH H, LIANG W J, HU H, et al. Influence analysis of Chinese Earth & climate system model in CMIP6 and overview of CMIP7[J]. *Advances in Earth Science*, 2025, 40(2):155-168.
- [2] 陆春晖,袁佳双,黄磊,等. 从 IPCC 看全球盘点中的关键科学问题及其对中国的启示[J]. 气候变化研究进展, 2024, 20(6): 736-746.
LU CH H, YUAN J SH, HUANG L, et al. Key scientific issues in the global stocktake from the perspective of IPCC and their implications for China[J]. *Climate Change Research*, 2024, 20(6): 736-746.
- [3] AKRAM A A, ABIDOYE B, KANNAN S, et al. The impact of climate change on African agriculture: A Ricardian analysis of smallholder farmers in sub-Saharan Africa[J]. *Climatic Change*, 2025, 178(3): 52.
- [4] 杨加春,王彦明,李庆军,等. 探空温度传感器误差预测技术研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(12): 24-36.
YANG J CH, WANG Y M, LI Q J, et al. Research on prediction technology of temperature sensor error in radiosonde[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2021, 35(12): 24-36.
- [5] 敖振浪,黄宏智,刘艳中,等. 内嵌式强制通风防辐射装置的研制[J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(1): 79-82.
AO ZH L, HUANG H ZH, LIU Y ZH, et al. Development of embedded forced ventilation radiation protection device[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2017, 36(1): 79-82.
- [6] 姚澄,刘清倦,杨杰,等. 一种气象温度传感器设计及实验研究[J]. 电子测量技术, 2022, 45(24): 9-14.
YAO CH, LIU Q Q, YANG J, et al. Design and experimental research of a meteorological temperature sensor [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2022, 45(24): 9-14.
- [7] RAMESH T N, ARAKERI H J. Actively and passively aspirated temperature sensors in a windless environment like greenhouses [J]. *Sadhana*, 2019, 44(4): 1-7.
- [8] WAUGH M S. The "U-Tube": An improved aspirated temperature system for mobile meteorological observations, especially in severe weather[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2021, 38(9): 1477-1489.
- [9] 伍峻杭,刘继春,吴沂洋. 偏远地区能源自洽系统源储容量协同配置方法[J]. 电网技术, 2024, 48(5): 2031-2042.
WU J H, LIU J CH, WU Y Y. Coordinated capacity configuration method of source and storage for energy self-sufficient system in remote areas [J]. *Power System Technology*, 2024, 48(5): 2031-2042.
- [10] NUREDIN V, SCHULZ L, KOCKMANN N, et al. Best practice approach for temperature measurement in flow chemistry based on CFD simulation[J]. *Journal of Flow Chemistry*, 2025, 15(1): 1-12.
- [11] 温嘉斌,赵红阳,刘子宁. 基于神经网络的无刷直流电机传感器故障检测及容错系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(10): 39-46.
WEN J B, ZHAO H Y, LIU Z N. Brushless DC motor sensor fault detection and fault-tolerant system based on neural network[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2018, 32(10): 39-46.
- [12] 毛家龙,刘清倦,潘旭,等. 机载探空温度传感器设计与研究[J]. 电子测量技术, 2024, 47(13): 1-9.
MAO J L, LIU Q Q, PAN X, et al. Design and research of airborne radiosonde temperature sensor[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2024, 47(13): 1-9.
- [13] 张旭,刘清倦,杨杰,等. 机载下投式探空温度传感器设计与实验研究[J]. 国外电子测量技术, 2024, 43(2):

- 107-113.
- ZHANG X, LIU Q Q, YANG J, et al. Design and experimental study of airborne dropsonde temperature sensor[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2024, 43(2): 107-113.
- [14] 韩思奇,邵欣,檀盼龙,等. 基于FLUENT下双声道超声波流量计最优声道研究[J]. 中国测试, 2018, 44(8): 140-146.
- HAN S Q, SHAO X, TAN P L, et al. Study on optimal sound path position of dual channel ultrasonic flowmeter based on FLUENT[J]. China Measurement & Test, 2018, 44(8): 140-146.
- [15] 伍兴国,雷钦礼. 再议普通最小二乘法下回归系数的性质[J]. 统计与决策, 2020, 36(1): 10-14.
- WU X G, LEI Q L. Reconsidering the properties of regression coefficients under ordinary least squares method[J]. Statistics & Decision, 2020, 36(1): 10-14.
- [16] LIU S N, CHEN L W. Study on the correction method of radiant temperature measurement of turbine blades under the background of high-temperature dynamics[J]. Instrumentation, 2025, 12(2): 80-90.
- [17] 江银玉,丁勇,左锋,等. 霍尔效应式力传感器的温度补偿[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(4): 9-17.
- JIANG Y Y, DING Y, ZUO F, et al. Temperature compensation of Hall-effect force sensor[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(4): 9-17.
- [18] 宋小凡,刘清倦,姚澄,等. 临近空间探空仪温度传感器设计[J]. 电子测量技术, 2023, 46(20): 1-6.
- SONG X F, LIU Q Q, YAO CH, et al. Design of temperature sensor for near space radiosonde[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(20): 1-6.

作者简介

田祥民, 硕士研究生, 主要研究方向为气象传感器设计与信号处理。

E-mail: 1619557209@qq.com

刘清倦(通信作者), 博士, 教授, 主要研究方向为集成电路、传感器技术、气象探测。

E-mail: qqliu@nuist.edu.cn